УДК 69:004

Научная статья

https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-2-19-28

Исследование установки вертикально-осевых ветряных турбин на верхних этажах высотных зданий

У Шисяо ✉, **С.Г. Шеина**

Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

✉ 1264950586@qq.com

Аннотация

Введение. В настоящее время быстро развивается отрасль строительства высотных и сверхвысотных зданий. Нехватка невозобновляемых источников энергии и ухудшение состояния окружающей среды — две основные проблемы, которые присутствуют в каждой стране. Именно поэтому интенсивно развивается ветроэнергетика, которая способна не только остановить стремительное ухудшение экологической ситуации, но и позволит повысить доступность энергоснабжения и значительно сократит дефицит энергии. Целесообразно использование энергии ветра для обеспечения чистыми возобновляемыми источниками энергии высотных зданий путем установки ветряных турбин с вертикальной осью на верхних этажах зданий. Цель работы — подтвердить, что ветряные турбины с вертикальной осью больше подходят для установки на верхних этажах высотных зданий в городах из-за их уникальных преимуществ (простая конструкция, простота обслуживания, адаптация к сложной и изменчивой ветровой среде, длительный срок службы), обеспечивающих безопасную и экологически чистую зеленую энергию для городов.

Материалы и методы. Для исследования была использована небольшая ветровая турбина с вертикальной осью. Эффективность различных ветровых турбин измерялась путем изменения силы и направления ветра при одинаковых условиях окружающей среды для определения, может ли ветротурбина с вертикальной осью работать безопасно, стабильно и эффективно в сложной и изменчивой ветровой среде города. В свою очередь, доказано, что для обеспечения городов экологически чистой энергией ветряные турбины с вертикальной осью больше подходят для установки на верхних этажах высотных зданий, чем ветряные турбины с горизонтальной осью.

Результаты исследования. Изменяя силу и направление ветра, было установлено, что вертикально-осевые ветровые турбины имеют хорошую и стабильную эффективность работы и могут обеспечить постоянный источник чистой энергии для городского развития более безопасным и стабильным способом.

Обсуждение и заключение. Ветряные турбины с вертикальной осью идеально приспособлены к сложной и меняющейся ветровой обстановке на верхних этажах высотных зданий и могут эксплуатироваться безопасно и эффективно, внося положительный вклад в снижение энергетической нагрузки и улучшение состояния окружающей среды.

Ключевые слова: ветроэнергетика; вертикально-осевые ветровые турбины; ветровые турбины; высотные здания.

Для цитирования. Шисяо У. Шеина С.Г. Исследование установки вертикально-осевых ветряных турбин на верхних этажах высотных зданий. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2023;2(2):19–28. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-2-19-28

Original article

Study on Installation of the Vertical Axis Wind Turbines on the Upper Floors of High-Rise Buildings

Wu Shixiao ✉, **Svetlana G Sheina**

Don State Technical University, 1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ 1264950586@qq.com

Abstract

Introduction. Nowadays the sector of high-rise and super high-rise buildings construction is rapidly developing. The deficiency of non-renewable energy sources and the deterioration of the environment are two major problems faced by every country. Therefore, the wind power engineering is intensely developing and is able not only to stop the rapid deterioration of environmental situation but also to improve accessibility of energy supply and considerably reduce the deficit of energy. It is rational to use the wind power to source the clean renewable energy for the high-rise buildings by installing the vertical axis wind turbines on the upper floors of the buildings. The aim of the work is to confirm that the vertical axis wind turbines are the best appropriate for installation on the upper floors of high-rise buildings in the cities due to unique advantages thereof (simple design, easy maintenance, adaptability to complicated and changeable wind environment, long operation life), which ensure the supply of the cities with the safe and clean green energy.

Materials and Methods. A small-size vertical axis wind turbine was taken for the study. The operation efficiency of various wind turbines was measured by changing the wind strength and direction under the same environmental conditions to determine whether a vertical axis wind turbine could operate safely, sustainably and efficiently in the complicated and changing wind environment of the city. Alongside it was proved that for ensuring the supply of the cities with the safe and clean energy the installation of the vertical axis wind turbines on the upper floors of high-rise buildings is more appropriate compared to the installation of horizontal ones.

Results. By changing the wind strength and direction, it was found that the vertical axis wind turbines have good and stable operation efficiency and can provide a constant source of clean energy for urban development in a safer and more stable way.

Discussion and Conclusions. The vertical axis wind turbines are ideally adapted to the complicated and changing wind conditions of the upper floors of high-rise buildings and can be safely and efficiently operated, making positive contribution to reducing the energy load and improving the state of environment.

Keywords: wind power engineering; vertical axis wind turbines; wind turbines; high-rise buildings.

For citation. Shixiao Wu, Sheina SG. Study on Installation of the Vertical Axis Wind Turbines on the Upper Floors of High-Rise Buildings. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2023;2(2):19–28. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-2-19-28

Введение. В связи с необходимостью уменьшения глобальной нехватки энергии и улучшения состояния окружающей среды страны по всему миру энергично продвигают зеленую энергетику. Комбинируя ветряные турбины с высотными зданиями, незанятые верхние этажи высотных зданий обеспечивают площадку для ветряных турбин, а ветряные турбины обеспечивают постоянный поток безопасной и экологически чистой зеленой энергии для города. Среди трудностей: сложная и изменчивая ветровая среда в городе, проблема шума ветряных турбин при работе, безопасная и эффективная эксплуатация ветряных турбин. Влияние ветряных турбин на городское планирование и внешний вид города. В статье представлена структура ветряных турбин с вертикальной осью, проверено стабильное рабочее состояние ветряных турбин с вертикальной осью в сложных и изменчивых условиях ветра и размер генерируемого шума, подтверждена возможность идеального сочетания ветряных турбин с вертикальной осью и высотных зданий для обеспечения города экологически чистой энергией.

Материалы и методы. Механическая структура небольшой ветряной турбины с прямым приводом на вертикальной оси (рис. 1) состоит из:

– ветряной турбины;
– генератора;
– вала;
– муфты;
– башни и т. д.

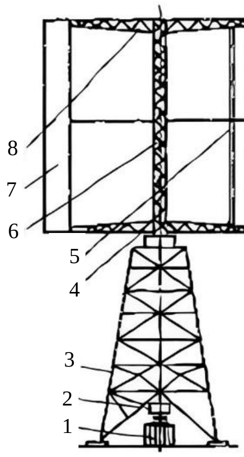


Рис. 1. Структура малой вертикально-осевой ветровой турбины:
1 — генератор; *2* — инкрементатор скорости; *3* — башня; *4* — нижняя опора; *5* — тормоза лезвия;
6 — вертикальный вал; *7* — лезвие; *8* — верхняя опора

Ось вращения ветротурбины с вертикальной осью перпендикулярна направлению ветра. Конструкция ветротурбины с вертикальной осью проста, и ветроколесо не обязательно должно быть обращено к ветру. Ее преимущества заключаются в следующем:

1) ветротурбина может принимать ветер любого направления, нет необходимости поворачивать ее «лицом» к ветру;

2) редукторы и генераторы могут быть установлены на земле для удобства обслуживания [1].

В соответствии с силовым методом лопастей его можно разделить на ветряные турбины подъемного типа и ветряные турбины сопротивления. Ветряные турбины подъемного типа используют подъем лопастей для приведения оси вращения во вращение, тем самым преобразуя энергию ветра в электрическую энергию. Этот вид ветряных турбин в настоящее время более распространен. Большинство ветряных турбин с горизонтальной осью относятся к ветряным турбинам подъемного типа. В настоящее время в крупных и средних ветроэнергетических установках в основном используются ветряные турбины с горизонтальной осью, которые представляют собой ветряные турбины подъемного типа, которые имеют следующие преимущества: высокая скорость и высокая степень использования ветра. Коэффициент скорости на кончике лопасти обычно превышает 4, а максимальный коэффициент мощности может достигать 50 % (рис. 2). Ветряные турбины резистивного типа используют сопротивление, получаемое на лопастях, для приведения генератора в действие для выработки электроэнергии. Большинство ветряных турбин резистивного типа — это ветряные турбины с вертикальной осью, которые в настоящее время встречаются редко (рис. 3).



Рис. 2. Подъем ветряных турбин [1]

[1] Precautions for Wind Turbine Installation Site Selection. Baidu : [сайт]. 2023. URL: https://clck.ru/33Ux2f (дата обращения : 07.02.2023).



Рис. 3. Сопротивление ветровых турбин[2]

Вертикальные ветряные турбины подъемного типа обладают преимуществами простой конструкции и легкого обслуживания вертикальных ветряных турбин. Они также имеют высокую скорость, как и ветряные турбины подъемного типа, и коэффициент использования энергии ветра был улучшен, а усилие во время работы более рациональное, чем у ветряных турбин с горизонтальной осью, увеличен срок службы больше [2]. Подводя итог, для более подробного рассмотрения были выбраны ветряные турбины с вертикальным рассматриваем.

Механическая структура небольшой ветровой турбины с прямым приводом с вертикальной осью состоит из: ветровой турбины, генератора, вала, муфты, башни и т.д. Создана плоская система координат, как показано на рис. 4, исходя из предположения, что вектор скорости ветра равен v, вектор скорости на конечной линии лопасти равен u, а угол между положением лопасти равен θ, средняя линейная скорость лопасти равна [3]

$$U = |u| = \frac{\pi D n}{60}.$$

На рис. 4 вектор скорости ветра $v = (0, -V)$, вектор скорости лопасти $u = (-U\sin\theta; U\cos\theta)$, относительная скорость ветра относительно лопасти $w = v + u$, а операция с координатами дает $w = (-U\sin\theta, -V + U\cos\theta)$.

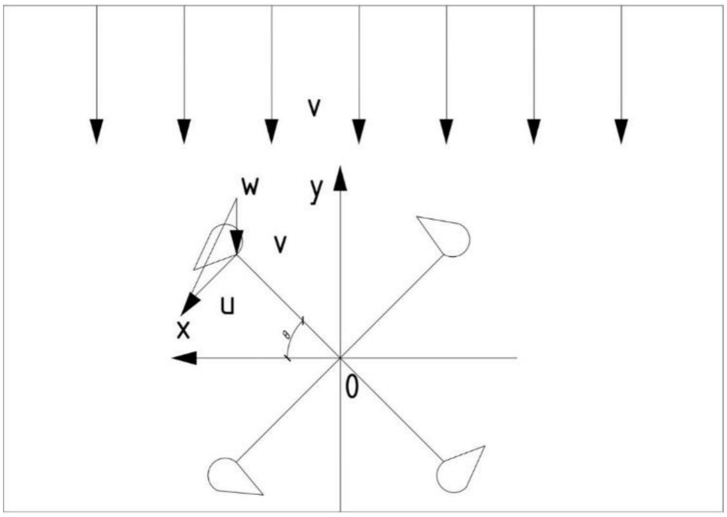


Рис. 4. Принцип работы вертикальной ветровой турбины [3]

[2]Motor heat generation for small mountainous areas Larg. Baidu: [сайт]. 2023. URL: https://clck.ru/33Uwi2 (дата обращения: 07.02.2023).

Величина скорости ветра равна *w*. *W* представляет единичный вектор *w*, а *U* представляет единичный вектор *u*. В это время может быть получен угол атаки α. Угол атаки — это угол между относительной скоростью ветра и прямой линией, где длина хорды лопасти находится. Его можно вычислить в соответствии с вектором.

$$\alpha = \cos^{-1}(W - U)$$

Под действием ветра подъемная сила F_1 и сопротивление F_d лопасти под углом атаки α могут быть рассчитаны по следующим формулам:

$$F_1 = \frac{1}{2}\rho S w^2 C_1,$$

$$F_d = \frac{1}{2}\rho S w^2 C_d.$$

Проекция подъемной силы и сопротивления на ветряную турбину в тангенциальном направлении определяются в следующем виде:

$$F_{lt} = F_l \sin\alpha,$$

$$F_{dt} = F_d \cos\alpha,$$

где F_{lt} — составляющая F_l в тангенциальном направлении; F_{dt} — составляющая F_d в тангенциальном направлении.

Силовое разложение лопасти показано на рис. 5 [4].

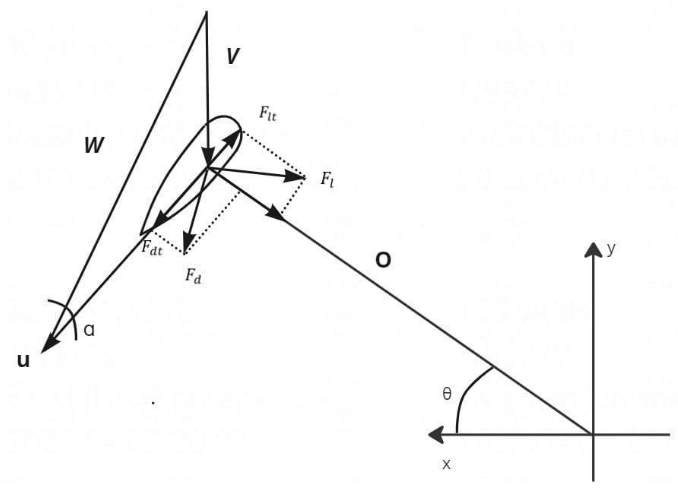


Рис. 5. Модель механики лопастей для вертикальных ветровых турбин [3]

Объединенная сила тангенциальной силы создает крутящий момент для вращения ветроколеса, а крутящий момент, создаваемый лопастью, когда угол положения равен θ, равен

$$M = (F_{lt} + F_{dt})R.$$

Коэффициент использования энергии ветра CP является важным параметром, который отражает эффективность работы ветряных турбин. Поскольку энергия ветра, проходящая через ветряную турбину, не может быть полностью преобразована в механическую энергию ветряной турбины, коэффициент использования энергии ветра CP составляет: [5].

$$C_P = \frac{P_m}{P_w},$$

где P_m — выходная механическая мощность ветровой турбины; P_w — энергия ветра, поступающая на ветровую турбину.

Коэффициент использования энергии ветра C_P обычно изменяется. Он изменяется со скоростью ветра и со скоростью вращения ветроколеса. Отношение линейной скорости кончика лопасти к скорости ветра называется коэффициентом скорости кончика лопасти λ. Для получения наилучшего коэффициента использования энергии ветра, соответствующее соотношение скоростей на кончике лезвия обычно выбирается в соответствии с кривой C_P – λ [6] (рис. 6).

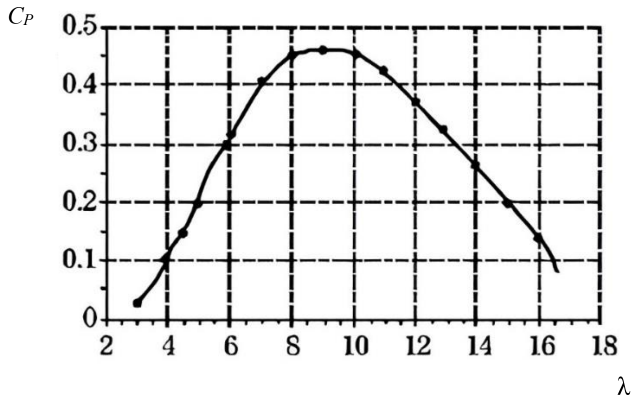


Рис. 6. График $C_P - \lambda$

Как видно из рис. 6, при достижении значения коэффициента скорости вращения кончика лопасти примерно 7,5 коэффициент использования энергии ветра является самым высоким, а значение CP имеет максимальное значение. В реальных условиях ветряная турбина обычно не достигает такого высокого коэффициента использования энергии ветра, поэтому сначала устанавливается коэффициент скорости вращения кончика лопасти на λ = 6, а коэффициент использования энергии ветра C_P = 0,4 при проектировании ветротурбины.

Предел Беца.

Закон Беца (англ. Albert Betz) — это базовая теория об эффективности использования энергии ветра при производстве ветроэнергетики, предложенная немецким физиком Альбертом Бецем в 1919 году. Закон Беца основан на предположении об «идеальном ветроколесе», смысл которого заключается в том, что вентилятор может воспринимать всю кинетическую энергию газа, проходящего через ветроколесо, и газ не оказывает сопротивления при условии, что газ представляет собой непрерывный, несжимаемый газ. В этом идеальном случае предельное соотношение энергии ветра которое может быть преобразовано в кинетическую энергию, составляет 16/27, что составляет около 59 %. Формула расчета выглядит следующим образом [7]:

$$\frac{dCp}{da}4(1-a)(1-3a)=0$$

где a — коэффициент индукции воздушного потока.

Решение дифференциального уравнения показывает, что при a = 1/3 C_P является наибольшим, и получается максимальное значение C_P = 0,59.

Отношение скорости линии кончика лопасти ветровой турбины к скорости ветра называется отношением скорости кончика лопасти. Отношение скорости кончика лопасти ветровой турбины сопротивления обычно составляет от 0,3 до 0,6, отношение скорости кончика лопасти ветровой турбины подъема обычно составляет от 3 до 8. В ветровой турбине подъема отношение скорости кончика лопасти непосредственно отражает относительную скорость ветра и угол направления движения лопасти, то есть непосредственно связан с углом атаки лопасти, что является важным параметром для анализа производительности ветровой турбины. Формула расчета коэффициента скорости вращения наконечников листьев следующая [8]:

$$\lambda=\frac{wR}{v}=\frac{2\pi nR}{60v},$$

где w — угловая скорость вращения турбины, n — скорость вращения ветряной турбины, R — радиус ветроколеса турбины, v — скорость ветра.

Для данной конструкции количество лопастей равно 4, коэффициент скорости верхушки λ = 5, ρ = 1,25 кг/м^3 и V = 8 м/с.

Мощность, вырабатываемая генератором, составляет 500 Вт, Кинетическая энергия проходит через муфту, и механизм роста достигает генератора. КПД муфты установлен на 0,99, КПД подшипника качения равен 0,99, КПД замкнутой передачи равен 0,97, а КПД генератора равен 0,71. Поэтому:

$$P_w=\frac{P}{C}=\frac{500}{40\%}=1250W,$$

$$Ne=\frac{p}{\eta}=\frac{1250}{0.99^2\times0.99^3\times0.97^2\times0.71}=1384.02W.$$

Таким образом, площадь размаха ветровой турбины, S, составляет:

$$S = \frac{2P_w}{\rho v^3} = \frac{2\times 1384.02}{1.25\times 8^3} = 4.325W.$$

Приведенные выше результаты показывают, что ветряная турбина с мощностью ветра 1384,02 Вт имеет площадь захвата 4,325 м^2 и вырабатывает 500 Вт при скорости ветра 8 м/с.

Оптимальное отношение высоты к диаметру ветровой турбины– это отношение высоты к диаметру ветровой турбины, которое должно быть выбрано из условия наименьшей стоимости изготовления лопастей при одинаковой выходной мощности.

$$H \times D = 4.32,$$

где H — высота ветроколеса, D — диаметр ветроколеса.

Получаем H =2,2 м, D =2,0 м, и полученная площадь развертки в основном соответствует требованиям.

Крутящий момент ветровой турбины [9]:

$$T = \frac{P}{w} = 0.5\pi\rho C_P R^3 \frac{v^2}{\lambda} = 0.5\times 3.14\times 1.25\times 0.4\times 1^3 \times \frac{8^2}{6} = 8.37N/m.$$

Общая площадь лопастей ветрогенератора в сравнении с площадью ветра, проходящего через колесо ветрогенератора, равна:

$$\sigma = NCL/2RL = NC/2R,$$

где C — длина хорды лопасти; N — количество лопастей; R — радиус ветряной турбины; L — длина лопасти.

При условии обеспечения аэродинамических характеристик ветроколеса необходимо минимизировать затраты на изготовление лопастей. Характеристики лезвия должны соответствовать следующим требованиям:

– коэффициент подъемной силы имеет большой наклон.

– малый коэффициент лобового сопротивления [10].

С учетом фактической площади установки и других требований общий размер вентилятора не должен быть слишком большим. Путем многократных итерационных вычислений определено, что диаметр развертки ветроколеса составляет 2 м, а длина хорды лопасти составляет 0,25 м.

Согласно графику зависимости между подъемной силой и коэффициентом лобового сопротивления аэродинамического профиля CLARK-Y и углом атаки α, когда угол атаки лопасти относительно направления ветра составляет 13°, турбина получает максимальную кинетическую энергию (рис. 7).

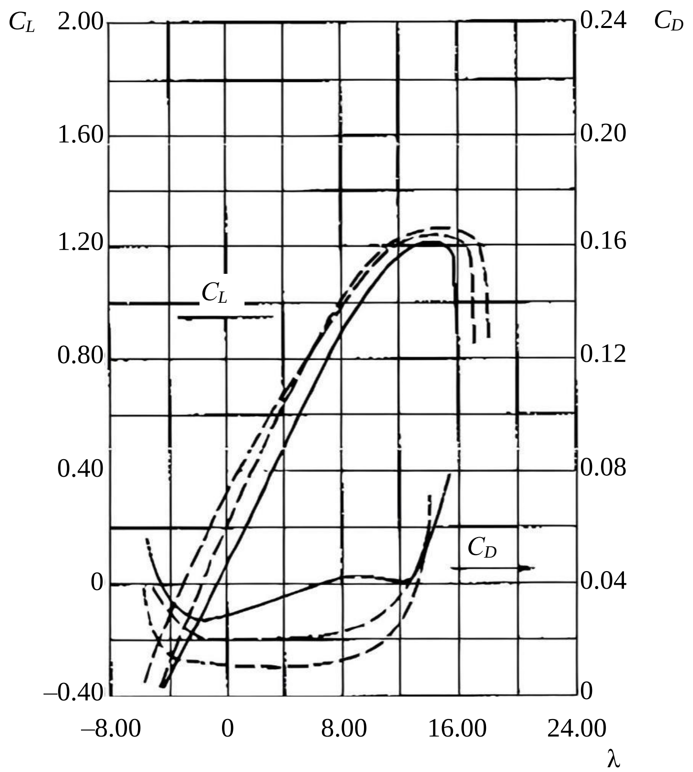


Рис. 7. График зависимости между подъемной силой и коэффициентом лобового сопротивления аэродинамического профиля CLARK-Y и углом атаки

При непрерывной работе ветроколеса лопасть всегда находится под наилучшим углом атаки в течение определенного периода времени. Определено, что при наилучшем угле атаки 13° получаемая кинетическая энергия ветра является наибольшей, а максимальный крутящий момент вырабатывается ветроколесом:

$$M = \frac{1}{2}\rho v^2 R(1+\cot^2\varphi)(C_L \sin\varphi - C_D \cos\varphi)S,$$

$$N = \frac{1}{2}\rho v^2 \cot\varphi(1+\cot^2\varphi)(C_L \sin\varphi - C_D \cos\varphi)S,$$

$$N = w \times M,$$

где ρ — плотность воздуха, 1,205 кг/м^3; R — радиус развертки ветроколеса, м; S — ветровая площадь одной лопасти, м^2; M — крутящий момент, образуемый лопастью после получения энергии ветра, Н·м.; N — мощность энергии ветра, принимаемая лопастью, W.

Полученные данные крутящего момента:

– при скорости ветра 2,50 м/с M = 1,6656 Н·м,
– при скорости ветра 3,00 м/с M = 2,3982 Н·м,
– при скорости ветра 3,55 м/с M = 3,3582 Н·м,
– при скорости ветра 4,26 м/с M = 4,8360 Н·м.

Результаты исследования. В ходе испытаний ветрогенератора с вертикальной осью были получены следующие экспериментальные результаты.

Ветровые турбины с вертикальной осью способны эффективно и безопасно работать в сложных и меняющихся ветровых условиях на верхних этажах высотных зданий. Для запуска и нормальной работы ветротурбины с вертикальной осью достаточно скорости ветра 1,7 м/с. Диапазон скоростей ветра, подходящий для работы, равен 2,5~25 м/с, а ветряная турбина достигает номинальной мощности, когда скорость ветра достигает 8 м/с. Когда скорость ветра достигает 40 м/с, ветряная турбина все еще может работать безопасно (таблица 1).

Таблица 1

Параметры ветряной турбины с вертикальной осью

Параметр	**Данные**
Мощность	500 В
Диаметр ветроколеса	2 м
Номинальная скорость	84,3 об/мин
Номинальная скорость ветра	8 м/с
Начальная скорость ветра	1,7 м/с
Рабочая скорость воздуха	2,5–25 м/с
Безопасная скорость ветра	40 м/с
Номинальная мощность	500 В

Обсуждение и заключения. Ветротурбина вертикального подъемного типа имеет низкие эксплуатационные требования. Установка вертикально-осевой ветровой турбины на верхнем этаже высотного здания позволяет полностью использовать потенциал энергии ветра. Ось вращения вертикально-осевой ветряной турбины перпендикулярна направлению ветра и не зависит от источника ветра. При постоянном изменении направления ветра вертикально-осевая ветровая турбина сохраняет нормальную и стабильную работу, что позволяет ей эффективно и безопасно работать в сложных и меняющихся ветровых условиях на верхних этажах высотных зданий. Экспериментальные данные, измеренные путем изменения величины ветра, когда скорость ветра достигает 1,7 м/с, показали, что ветротурбина с вертикальной осью может запуститься и работать нормально. При скорости ветра 40 м/с ветряная турбина все еще может работать безопасно.

Ветряные турбины с вертикальным подъемом полностью адаптированы к сложной и изменчивой ветровой среде на верхних этажах высотных зданий и могут работать безопасно и эффективно, обеспечивать постоянный поток чистой энергии для высотных зданий и превращать высотные здания из основного потребителя энергии в энергетически самодостаточные и даже стать экспортерами энергии, которые играют позитивную роль в снижении энергетического давления и улучшении состояния окружающей среды.

Список литературы

1. Яньбин Ц., Чжи Л. Проектирование ветряной турбины с вертикальной осью. *Machinery*. 2012;39:36–39. URL: http://www.jixiezazhi.com/index.aspx?menuid=5&type=articleinfo&lanmuid=52&infoid=7753&language=cn (дата обращения: 29.01.2023).

2. Вэй Ч. *Динамика ветротурбины с вертикальной осью типа H*. Ланьчжоу: Ланьчжоуский университет Цзяотон; 2021. URL: https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=1021137285.nh&DbName=CMFD2022 (дата обращения: 21.01.2023).

3. Сяомин Ж., Чжин М., Чжуанмин К. Основной состав и аэродинамические характеристики ветрогенераторов с вертикальной осью, подключенных к сети. *Журнал солнечной энергетики*. 2007:28–31. URL: https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=TYNZ200702013&DbName=CJFQ2007 (дата обращения: 21.01.2023).

4. Юньфэн С. *Проектирование и эксперимент ветротурбины с вертикальной осью*. Сельскохозяйственный университет Внутренней Монголии; 2008. URL: https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=2008131823.nh&DbName=CMFD2008 (дата обращения: 21.01.2023).

5. Сюнь Н. *Исследование системы управления ветроэнергетикой с двойным питанием, основанной на адаптивном наблюдателе скорости*. Центрально-Южный университет; 2009. URL: https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspxFileName=2009239374.nh&DbName=CMFD2010 (дата обращения: 19.01.2023).

6. Байлин Ф., Цзюньпэн В., Гоолян В. и др. Влияние числа лопастей на аэродинамические характеристики вентилятора с малой вертикальной осью. *Научно-технический бюллетень*. 2021;37:58–63. URL: https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=KJTB202105012&DbName=DKFX2021 (дата обращения: 20.01.2023).

7. Дин В. *Исследование и проектирование автономной маломасштабной ветро-солнечной гибридной электростанции система генерации*. Университет Наньхуа; 2022. URL: https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=1023450690.nh&DbName=CMFDTEMP (дата обращения: 20.01.2023).

8. Юаньсин Ч. *Исследование динамических напряженных характеристик лопаток ветротурбин под воздействием пневматической нагрузки*. Технологический университет Внутренней Монголии; 2021. URL: https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=1021805608.nh&DbName=CDFD2022 (дата обращения: 19.01.2023).

9. Синьчэнь В. *Проектирование ветроэнергетической системы с вертикальной осью на основе Matlab_Simulink*. Сямыньский университет; 2008. URL: https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=2009079413.nh&DbName=CMFD2009 (дата обращения: 20.01.2023).

10. Хуэйли В. *Проектирование и оптимизация конфигурации мощности малой ветровой и солнечной дополнительной системы выработки электроэнергии*. Университет Цзянсу; 2021. URL: https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=1021684282.nh&DbName=CMFD2022 (дата обращения: 20.01.2023).

Reference

1. Yan'bin TS, Chzhi L. Proektirovanie vetryanoi turbiny s vertikal'noi os'yu. *Machinery*. 2012;39:36–39. Available at: http://www.jixiezazhi.com/index.aspx?menuid=5&type=articleinfo&lanmuid=52&infoid=7753&language=cn (accessed: 29.01.2023). (In Chinese).

2. Vehi CH. *Dinamika vetroturbiny s vertikal'noi os'yu tipa H. Lan'chzhou.* Lan'chzhouskii universitet Tszyaoton – Lanzhou Jiaotong University; 2021. Available at: https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=1021137285.nh&DbName=CMFD2022 (accessed: 21.01.2023). (In Chinese).

3. Syaomin ZH, Chzhin M, Chzhuanmin K. Osnovnoi sostav i aehrodinamicheskie kharakteristiki vetrogeneratorov s vertikal'noi os'yu, podklyuchennykh k seti. *Zhurnal solnechnoi ehnergetiki – Journal of Solar Energy*. 2007:28–31. Available at: https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=TYNZ200702013&DbName=CJFQ2007 (accessed: 21.01.2023). (In Chinese).

4. Yun'fehn S. *Proektirovanie i ehksperiment vetroturbiny s vertikal'noi os'yu*. Sel'skokhozyaistvennyi universitet Vnutrennei Mongolii – Inner Mongolia Agricultural University; 2008. Available at: https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx? FileName=2008131823.nh&DbName=CMFD2008 (accessed: 21.01.2023). (In Chinese).

5. Syun' N. *Issledovanie sistemy upravleniya vetroehnergetikoi s dvoinym pitaniem, osnovannoi na adaptivnom nablyudatele skorosti*. Tsentral'no-Yuzhnyi universitet – Central South University; 2009. Available at: https://kns.cnki.net/kcms/detail/ detail.aspxFileName=2009239374.nh&DbName=CMFD2010 (accessed: 19.01.2023). (In Chinese).

6. Bailin F, Tszyun'pehn V, Goolyan V, Tszyamen TS, Khunvehi V, Sontszi' TS. Vliyanie chisla lopastei na aehrodinamicheskie kharakteristiki ventilyatora s maloi vertikal'noi os'yu. *Nauchno-tekhnicheskii byulleten' - Science and Technical Bulletin.* 2021;37:58–63. Available at: https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=KJTB202105012&DbName=DKFX2021 (accessed: 20.01.2023). (In Chinese).

7. Din V. *Issledovanie i proektirovanie avtonomnoi malomasshtabnoi vetro-solnechnoi gibridnoi ehlektrostantsii sistema generatsii.* Universitet Nan'khua – Nanhua University; 2022. Available at: https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=1023450690.nh&DbName=CMFDTEMP (accessed: 20.01.2023). (In Chinese).

8. Yuan'sin CH. *Issledovanie dinamicheskikh napryazhennykh kharakteristik lopatok vetroturbin pod vozdeistviem pnevmaticheskoi nagruzki*. Tekhnologicheskii universitet Vnutrennei Mongolii – Inner Mongolia University of Technology; 2021. Available at: https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=1021805608.nh&DbName=CDFD2022 (accessed: 19.01.2023). (In Chinese).

9. Sin'chehn' V. *Proektirovanie vetroehnergeticheskoi sistemy s vertikal'noi os'yu na osnove Matlab_Simulink*. Syamyn'skii universitet – Xiamen University; 2008. Available: https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=2009079413.nh&DbName=CMFD2009 (accessed: 20.01.2023). (In Chinese).

10. Khuehili V. *Proektirovanie i optimizatsiya konfiguratsii moshchnosti maloi vetrovoi i solnechnoi dopolnitel'noi sistemy vyrabotki ehlektroehnergii*. Universitet Tszyansu – Jiangsu University; 2021. Available at: https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=1021684282.nh&DbName=CMFD2022 (accessed: 20.01.2023). (In Chinese).

Об авторах:

Шеина Светлана Георгиевна, заведующая кафедрой «Городское строительство и хозяйство» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ScopusID, ORCID, rgsu-gsh@mail.ru

У Шисяо, аспирант по направлению «Технология и организация строительства» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, 1264950586@qq.com

Заявленный вклад соавторов:

У Шисяо — формирование основной концепции, методология исследования, подготовка текста, формирование выводов; С.Г. Шеина — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Поступила в редакцию 31.03.2023.
Поступила после рецензирования 17.04.2023.
Принята к публикации 17.04.2023.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Svetlana G Sheina, head of the Urban Construction and Utilities Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), D. Sc. (Engineering), professor, ScopusID, ORCID, rgsu-gsh@mail.ru

Wu Shixiao, PhD student of the study programme “Technology and organisation of construction”, Don State Technical university (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, 1264950586@qq.com

Claimed contributorship:

Wu Shixiao — formulating the main concept, research methodology, preparing the text, formulating conclusions; SG Sheina — scientific supervision, research results’ analysis, revision of the text, correction of the conclusions.

Received 31.03.2023.
Revised 17.04.2023.
Accepted 17.04.2023.

Conflict of interest statement

The authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.